

佐賀大農彙 (Bull. Fac. Agr., Saga Univ.) 100 : 43~53 (2015)

見かけの誘電率および電気伝導度計測法としての SDI-12型時間領域透過法 (TDT) センサーの性能評価

上村 将彰・宮本 英揮
(環境地盤学分野)
平成26年11月4日 受理

Performance Evaluation of a Time Domain Transmissiometry (TDT) Sensor with
SDI-12 for Coupled Measurements of Apparent Permittivity and Electrical Conductivity

Masaaki UEMURA, Hideki MIYamoto
(Laboratory of Environmental Geotechnics)
Accepted November 4, 2014

Summary

Time domain transmissiometry (TDT), a method of measuring transmitted broadband signal in microwave frequency, has been drawing a lot of attention more than ever as an alternative method to monitor water content and electrical conductivity (EC) in soils. To demonstrate the validity of measurement of apparent permittivity (ε_{TDT}) and EC by commercial digital TDT sensors with SDI-12, we measured ε_{TDT} , bulk electrical conductivity (σ_{TDT}), and TDT waveforms of several types of fluid media using the sensors. Although the determination of ε_{TDT} and σ_{TDT} of an extremely high-conductive medium was not completed due to the inadmissible loss of the transmitted signal, we successfully determined both properties of moderate - conductive media by the sensors. More accurate estimates of σ_{TDT} were determined in wide EC range by substituting maximum slope (S_{Max}) values of TDT waveforms obtained into an empirical expression derived from relationship between the S_{Max} and actual EC values. From this result, we concluded that the evaluation of sensor performance can be easily conducted by the testing for the fluid media.

Key words: TDR, TDT waveform, Apparent permittivity, Electrical conductivity, Maximum slope

1. はじめに

農耕地の土壌水分・電気伝導度 (EC) の計測手法として、時間領域反射法 (Time domain Reflectometry, TDR) が多用されている。TDR は、土中に挿入した開放端型センサーに広帯域のマイクロ波信号を送信し、センサー先端で生じる反射信号の時間領域波形 (TDR 波形) を取得・解析する手法である (Fig. 1)。TDR 波形から求められる信号の伝播速度から見かけの誘電率を決定し、それに基づいて土壌水分量を、また、反射信号の強度から電気伝導度をそれぞれ決定可能である^{1)~3)}。

TDR には技術的課題が認められる。TDR センサーのサンプリングエリア内にマクロボアや

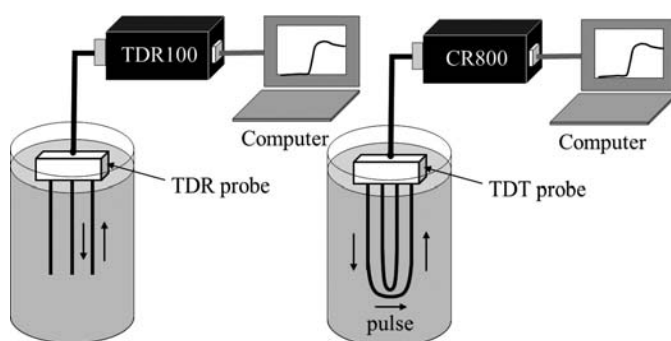


Fig. 1 TDR および TDT の測定の様式図

亀裂などの誘電特性の不連続点が存在すると、その点で生じる信号の反射波が複雑な凹凸として TDR 波形に混入する。既存のソフトウェアを用いてそのような波形の解析を行うと、TDR 波形の立ち上がり点の検出が困難になるため、解析誤差が生じ易い⁴⁾。また、同軸ケーブルの特性インピーダンスは温度依存性を示す⁵⁾。温度が高いほど、ケーブルを伝播する過程で高周波成分が減衰し、TDR 波形の凹凸が緩やかになることによっても立ち上がり点の検出が困難になり得る⁵⁾。

近年、新たな土壌水分・EC 計測手法として、時間領域透過法 (Time domain transmissiometry, TDT) が検討されている^{6)~8)}。TDT では、センサーの信号送信部と受信部が分離しており、感知部を透過した信号の時間領域波形 (TDT 波形) を計測対象とする点が TDR と異なる (Fig. 1)⁴⁾。しかし、TDT にも TDR と同一の電子機器を転用できる⁴⁾ことなどから、両者は技術的互換性の高い手法である。

既に、インパルス信号を用いた TDT による流体や砂の誘電特性計測が実施されており、その利点や課題が明らかになりつつある^{7), 8)}。立ち上り点の前後の勾配の交点を検出する従来の TDR の信号解析アルゴリズムと違って、インパルス型 TDT の信号解析には、波形のピーク点を検出する単純なアルゴリズムを用いることができる⁷⁾。TDT においても、誘電特性の不連続点間において信号の多重反射が起きるが、その信号は最短距離で伝播した信号よりもオシロスコープに到達する時間に遅延が生じ、信号の強度も弱いので、それらのノイズはピーク点の検出プロセスに影響しない⁷⁾。そうした利点を有する反面、土壌に挿入できる従来の TDR センサーと違って、ループ状の感知部を有する TDT センサーは、土壌を乱さずに挿入することが難しい⁶⁾。

SDI-12 プロトコル⁹⁾に対応した Acclima 社製のデジタル TDT センサーが流通している。固有の SDI アドレスを設定することで、SDI-12 プロトコル対応のデータロガーの各チャンネルに、最大で10組のセンサーを接続可能である。見かけの誘電率を出力する機能を有するため、TDR に代表される既存の誘電率法で取得した校正式を無駄なく活用することが可能である。また、波形の解析のための情報、例えば、信号の伝播時間や波形の勾配などを出力させることもできるため、それらに基づいた独自の解析を行うことも可能である。ケーブル長を約60mまで延長できる SDI-12 の利点を活かせば、半径60m以内の多点計測を実施できる。TDT は以上のような長所を有するものの、デジタル TDT センサーの適用事例は少なく、同センサーの計測精度や計測限界は十分に明らかになっていない。

センサーの性能評価を行う場合には、センサーと測定媒質とが完全に接触し、かつ媒質が均一であることが望ましい。信号の伝播時間には、測定媒質の均一性と感知部との接触不良が影

響を及ぼし得る。土壌を測定対象としたセンサーテストでは、こうした要因を完全に排除することが難しい。そのため、TDRの計測精度評価に関する既往の研究でも、均質かつセンサーとの完全接触が期待できるエタノールなどの液体や気体を測定対象とした例が多い^{5), 6)}。

本研究では、デジタルTDTセンサーによる見かけの誘電率およびEC計測の有効性を明らかにするために、2点について検討を行った。第1に空気、水、エタノールなどの均一流体のTDT波形を解析して、見かけの誘電率の測定感度・精度を調べた。第2にECを調整したNaCl溶液を対象として、センサーが出力する見かけの誘電率と電気伝導度のEC依存性および計測限界を調べた。

2. 実験方法

2.1 SDI-12型デジタルTDTセンサーの特徴

本研究ではAccclima社のSDI-12型TDTセンサー(ACC-SEN-SDI)を評価試験の対象とした。同センサーはループ状の2本のステンレス鋼棒(直径3.5mm)を平行に配した感知部を有し、感知部の長さは20.3cm、幅は5.4cmである(Fig. 2)。

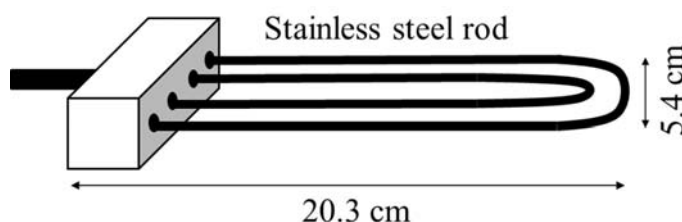


Fig. 2 TDTセンサーの模式図

エポキシ樹脂で固定され、耐熱・耐水性に優れたセンサーヘッド部には、ステップパルス信号の送受信とその解析機能を有するマイクロチップとTC-77型温度チップとが組み込まれている。TDTセンサーをSDI-12プロトコル対応のデータロガーに接続することにより、体積含水率(θ)、温度、見かけの誘電率(ϵ_{TDT})、電気伝導度(σ_{TDT})の4項目に加え、5項目の波形解析情報(波形の最大勾配点の勾配値、最大勾配点における波形の振幅、伝播時間など)を出力できる。また、SDI12/RS-232Cインターフェイスを介して同センサーをコンピュータに接続し、5 psの時間分解能でTDT波形を取得することもできる。

2.2 見かけの誘電率の計測精度の評価実験

ϵ_{TDT} の変化に対するTDT波形の変化を調べるために、空気、蒸留水(DW)に加え、濃度の異なるエタノールのTDT波形を測定した。プラスチック製円筒容器(内径25.5cm、高さ28cm)の水平断面中央に2組のTDTセンサーを、センサー感知部の間隔が約2cmになるように固定した。自作のSDI-12/RS-232Cインターフェイスを介して、空気のTDT波形(時間分解能5 ps)をテキストデータとして保存した(Fig. 3(a))。DWおよび濃度の異なる5種類のエタノール(20%, 40%, 60%, 80%, 99.5%)を円筒容器に注ぎ、波形の計測を反復した。

見かけの誘電率の測定感度を調べるために、各流体の ϵ_{TDT} および透過信号の伝播時間を計測した。すなわち、各流体中に固定したセンサーをCR800データロガー(Campbell Scientific社)に接続した後、データロガーを介してセンサーにSDI-12コマンドを送信し、各流体の ϵ_{TDT}

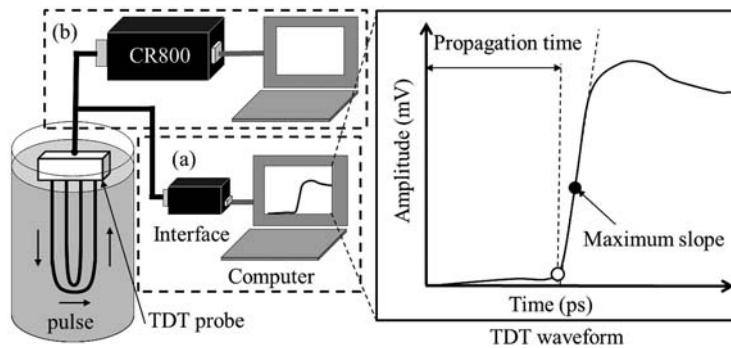


Fig. 3 (a) TDT 波形および(b)多要素の測定の様式図

および伝播時間を10分間隔で20回測定した (Fig. 3 (b)). 計3組のセンサーを対象に同一計測を反復した後, 従来の TDR の計測結果⁹⁾と比較することによって, ε_{TDT} の計測感度を調べた.

2.3 電気伝導度の計測精度および計測限界の評価実験

σ_w の変化に対する波形勾配および振幅の応答を調べるために, NaCl 溶液の TDT 波形を測定した. 蒸留水で満たしたプラスチック製円筒容器内に TDT センサーを固定し, 自作インターフェイスを介して ε_{TDT} , σ_{TDT} , 波形最大勾配値, 振幅値の計4項目の測定を行うとともに, TDT 波形をコンピュータに取り込んだ. その後, 蒸留水に NaCl を加え, σ_w を5段階 ($0.5, 1.2, 2.1, 3.0, 10.2 \text{ dS m}^{-1}$) で増加させ, 各段階において同一測定を反復した (Fig. 3 (a)).

EC の計測精度およびその計測限界を調べるために, EC 計で測定した NaCl 溶液の σ_w と TDT センサーで測定した σ_{TDT} とを比較した. プラスチック円筒容器内に満たした蒸留水中に固定した TDT センサーを CR800 データロガーに接続し, σ_{TDT} , 波形最大勾配値, 振幅値の計3項目を測定した (Fig. 3 (b)). 蒸留水に NaCl を加えて攪拌することで σ_w を37段階で増加させ, 上述の計3項目の測定を反復した. 別途, 2組の TDT センサーにおいても一連の計測を反復した.

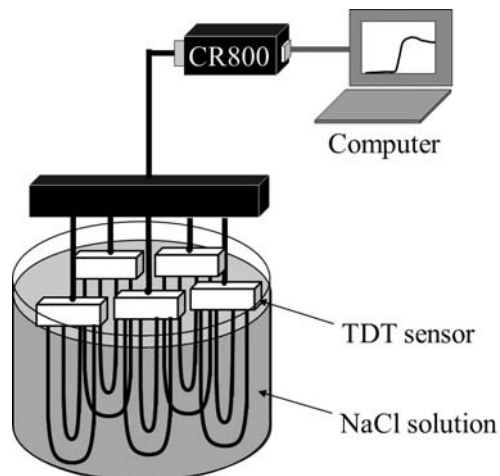


Fig. 4 実験様式図

EC 計測におけるセンサーの個体差を調べるために、10組の TDT センサーの出力値を比較した。すなわち、同一容器内に満たした蒸留水中に 5 組の TDT センサーを固定し、それらを CR800 データロガーに接続した (Fig. 4)。

蒸留水に NaCl を加えて σ_w を 10 段階で増加させ、各段階の σ_{TDT} および波形最大勾配値を、1 分間隔で 10 回測定した。同一モデルの 5 組の TDT センサーについても一連の計測を反復し、計 10 組のセンサーから得られた測定値の個体差と、 σ_{TDT} および波形最大勾配値に及ぼす σ_w の影響を調べた。

3. 結果と考察

3.1 見かけの誘電率の計測精度

各媒質の TDT 波形はピーク電圧を伴った立ち上がり部と、それに続く右肩下がり形状を示した (Fig. 5 (a))。従来の TDR 波形には、プローブ始端で生じる反射波を示す第 1 ピーク点と、プローブ先端で生じる反射波を示す立ち上がり部が計測される。一方、透過信号を計測する TDT では、最速でプローブを透過した成分を表すピーク点に加え、伝送路を伝播する過程で生じた反射信号の遅延成分がピーク点の後に続く点が従来の TDR とは異なる。他の 2 組のセンサーを用いて計測した波形も、類似した形状を示した (図は省略)。

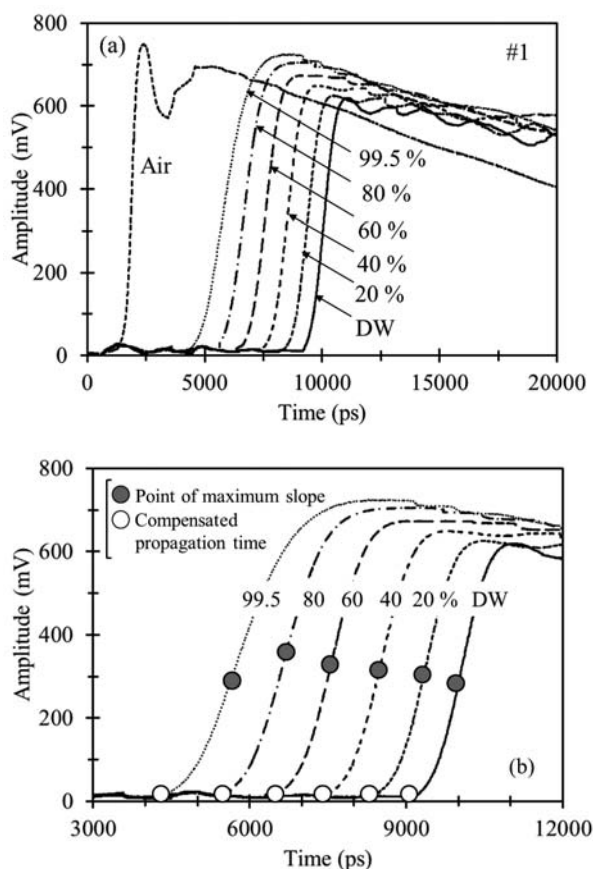


Fig. 5 (a)各流体の TDT 波形および(b)その拡大図

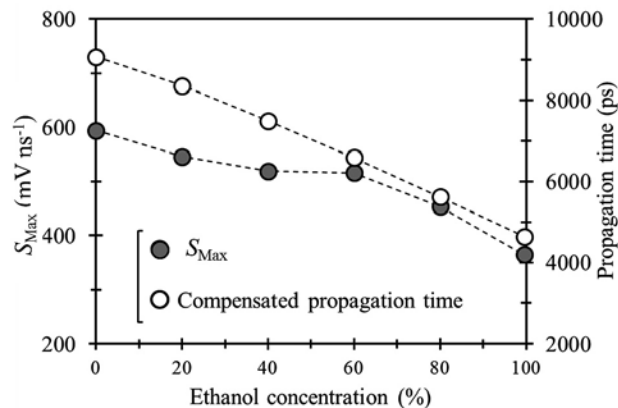


Fig. 6 エタノール濃度と波形最大勾配 (S_{Max}) および伝播時間との関係

各流体の TDT 波形の立ち上がり点の時間には、差異が認められた。TDT 波形の立ち上がり点 (Fig. 5 (b) の白丸) の時間 (Compensated propagation time) は、エタノール濃度が低いほど大きかった (Fig. 6)。TDR では、見かけの誘電率が高い媒質ほど、波形の立ち上がり点の時間、すなわち信号の伝播時間が大きくなる¹⁾。TDT 波形の立ち上がり点の差異も、エタノールの見かけの誘電率の違いによる信号伝播時間の差異を反映したものである。

媒質によって、波形勾配に差異が認められた。エタノール濃度の低下とともに、波形最大勾配点 (Fig. 5 (b) の黒丸) の勾配 (S_{Max}) 値は低下した (Fig. 6)。信号の吸収量を表す複素誘電率の虚数部のスペクトルが大きな媒質ほど、透過信号の電気エネルギーを大きく吸収する。特に、立ち上がりの鋭さを決定する高周波成分の吸収量が大きい場合には、波形の勾配が緩やかになる¹⁰⁾。TDT センサーの計測周波数帯では、エタノール濃度が高いほど高周波帯の虚数部が大きくなる¹¹⁾、 S_{Max} 値の低下、すなわち、測定に寄与する周波数の低下につながったと考える。

TDT センサーによる見かけの誘電率の計測感度は、従来の TDR と同程度であった。測定された ϵ_{TDT} は、エタノール濃度の増加とともに減少した (Fig. 7)。各媒質の ϵ_{TDT} は、ケーブルテスターを利用した TDR による測定値 (ϵ_{TDR})¹²⁾ との 1 : 1 線上に概ね分布した (Fig. 8)。

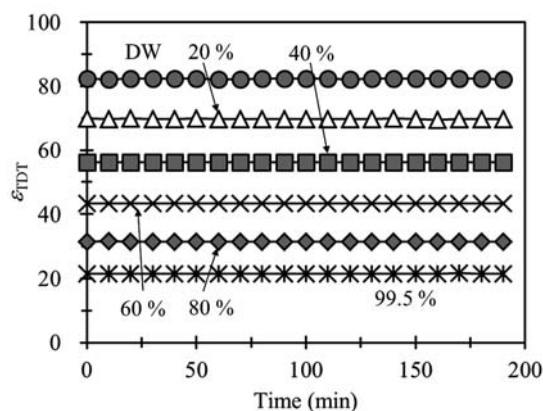


Fig. 7 見かけの誘電率 (ϵ_{TDT}) の経時変化

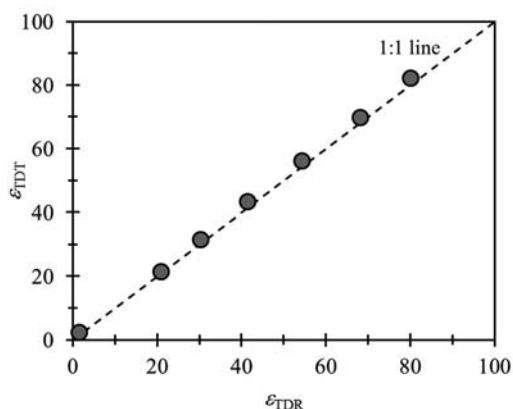


Fig. 8 TDRで測定した見かけの誘電率 (ϵ_{TDR})¹²⁾とTDTで測定した見かけの誘電率 (ϵ_{TDT})との関係

ϵ_{TDT} 値と ϵ_{TDR} 値とが一致したことは、TDT センサーが TDR に劣らない計測感度を有することを示すものである。

3.2 EC の計測精度および適用限界

透過信号の伝播時間に及ぼす σ_w の影響は軽微であった (Fig. 9 (a)). 各 NaCl 溶液の TDT 波形には、エタノールの場合と同様に、ピーク点を有する立ち上がり部が確認された (Fig. 9 (a)). 波形の立ち上がり点 (Fig. 9 (b) の白丸) の時間は、 σ_w の増加によらず概ね同一の値を示した (Fig. 9 (b)). TDR でも、 σ_w の増減によって波形の振幅は変化する¹⁾ものの、立ち上がり点から算出される信号伝播時間と、それに基づく見かけの誘電率の差異は小さい。TDT においても、TDR と類似した特徴が認められたことは、同法の有用性を示している。

TDT 波形の勾配には、 σ_w による差異が認められた (Fig. 9 (b)). σ_w の増加とともに波形は平滑化し、最も濃度の高い 10.2 dS m^{-1} ではほぼ平坦となった (Fig. 9 (b)). TDT 波形の S_{Max} 値 (Fig. 9 (b) の黒丸) および振幅値 (Amplitude at maximum slope) は、 σ_w の増加とともに減少し、 $\sigma_w \geq 5.0 \text{ dS m}^{-1}$ では、ゼロを示した (Fig. 10). 一般に、媒質中のイオン濃度が高いほど、複素誘電率の虚数部に占めるイオン伝導の影響は大きい¹⁰⁾. Fig. 6 と類似した S_{Max} の低下は、イオン伝導に伴う信号強度の低下によるものであると考える。

波形勾配および立ち上がり点の検出限界と、TDT センサーの適用限界との間に関連性が認められた。 $\sigma_w \leq 5.0 \text{ dS m}^{-1}$ では、3組のセンサー全てを利用して ϵ_{TDT} を決定できた (Fig. 11). また、各センサーの σ_{TDT} 値は、概ね σ_w との 1 : 1 線上に分布した (Fig. 12). σ_{TDT} 値がゼロを示した $\sigma_w \geq 5.0 \text{ dS m}^{-1}$ を除けば、3組のセンサーの二乗平均平方根誤差 (RMSE) はそれぞれ 0.63 , 0.59 , 0.43 dS m^{-1} であった。 σ_w が 5.0 dS m^{-1} を超えると、TDT 波形の平滑化によって、勾配や振幅を計測できなかったように (Fig. 10), 立ち上がり点の時間も検出できなくなることが原因で、 ϵ_{TDT} と σ_{TDT} がゼロを示したと考える。

低 EC 条件において、 σ_{TDT} 値を測定するためには、別途、校正を行う必要がある。10組のセンサーで測定した全 σ_{TDT} 値の σ_w に対する RMSE は 0.23 dS m^{-1} であり (Fig. 13), 特に σ_w が 0.5 dS m^{-1} 以下の低 σ_w 条件では、 σ_{TDT} 値は過大評価された (Fig. 13). 低 EC 条件においても、より高い精度の EC 値を得るためには、新たな校正法を検討する必要がある。

σ_{TDT} は、 S_{Max} と σ_w の経験的關係 (Fig. 10) に基づいて、マイクロチップ内で計算されてい

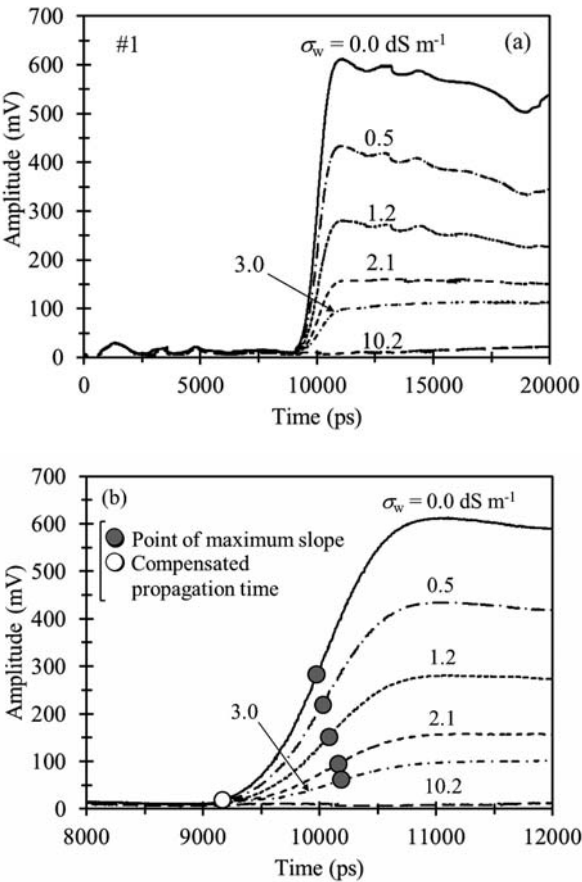


Fig. 9 (a)NaCl 溶液の TDT 波形および(b)その拡大図

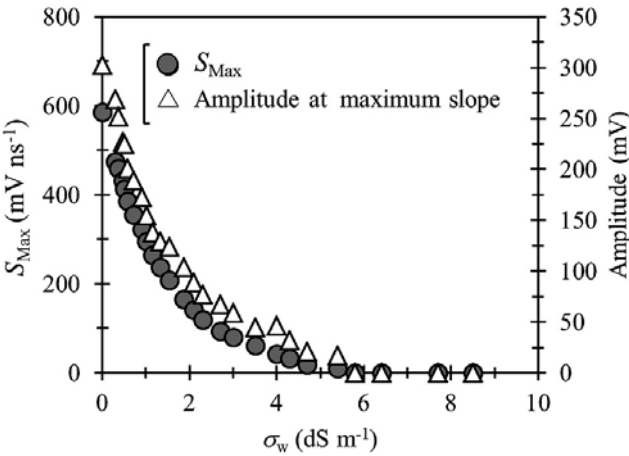


Fig. 10 溶液電気伝導度 (σ_w) と波形最大勾配値 (S_{Max}) およびその振幅との関係

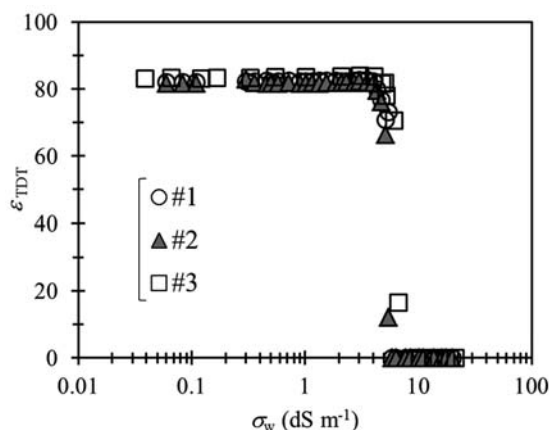


Fig. 11 溶液電気伝導度 (σ_w) と見かけの誘電率 (ε_{TDT}) との関係

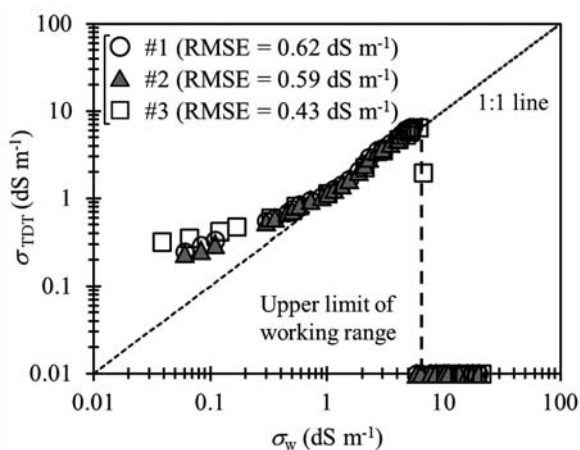


Fig. 12 溶液電気伝導度 (σ_w) と TDT センサーで測定した電気伝導度 (σ_{TDT}) との関係

る. 10組のセンサーを用いて測定した S_{Max} 値の個体差は小さかったことを利用して (Fig. 14), 全センサーを用いて測定した S_{Max} - σ_w 関係を対数関数で近似し, 次式を得た.

$$\sigma_w = -1.716 \ln(S_{Max}) + 10.948 \quad (1)$$

全センサーの S_{Max} 値を (1) 式に代入して算出した σ_{TDT} 値は 1 : 1 線近傍に分布し, それらの RMSE は 0.07 dS m^{-1} であった (Fig. 13 の白抜き三角). 同一モデルの TDT センサーを用いる場合には, 別途, 測定した S_{Max} を (1) 式に代入することにより, 低 EC 条件における EC 計測精度の向上が期待できるであろう.

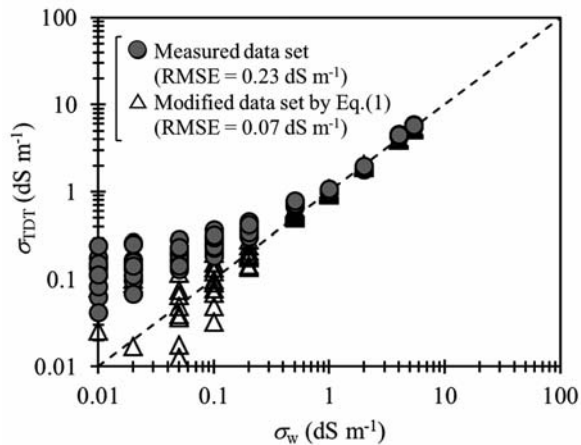


Fig. 13 溶液電気伝導度 (σ_w) と10組の TDT センサーの全測定値 (σ_{TDT}) との関係

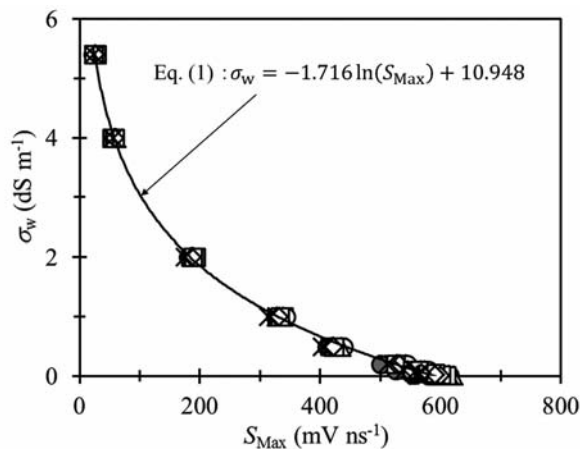


Fig. 14 最大勾配値 (S_{Max}) と溶液電気伝導度 (σ_w) との関係

4. おわりに

本研究では、Acclima 社製の SDI-12型デジタル TDT センサーによる見かけの誘電率および EC 計測の有効性を明らかにするために、誘電特性の異なる流体を対象に、TDT 波形、見かけの誘電率 (ϵ_{TDT})、電気伝導度 (σ_{TDT}) の計測を行った。TDT 波形の立ち上がり点の時間は流体の見かけの誘電率によって、また、波形の勾配は EC によって変化した。TDT センサーは、従来の TDR と同程度の ϵ_{TDT} の計測感度を有したが、低 EC 条件においては、媒質の EC を過大評価する傾向が認められた。しかし、 S_{Max} と σ_w の経験的關係に基づく校正式を導出し、同式を用いて σ_{TDT} の再計算を行うことにより、EC 計測の高精度化を実現できることが明らかになった。

TDR センサーと違って、ループ状の感知部を有する TDT センサーは土壌を乱すことなく設置することは難しい。しかし、比較的安価であることに加え、誘電特性の不連続点に起因す

る反射波による波形解析エラーが生じにくい TDT は、不均一な野外の土壌モニタリングにおける強力な研究ツールとなろう。

摘 要

土壌水分・電気伝導度 (EC) のモニタリング手法として、マイクロ波広帯域透過信号を計測する時間領域透過法 (TDT) が注目されている。TDT センサーによる見かけの誘電率および EC 計測の有効性を明らかにするために、SDI-12 型デジタル TDT センサーを用いて、誘電特性の異なる流体の TDT 波形、見かけの誘電率 (ε_{TDT})、電気伝導度 (σ_{TDT}) を計測した。透過信号が大きく減衰し、波形解析が不可能となる高 EC 条件を除けば、同センサーを用いることで、 ε_{TDT} と σ_{TDT} とを同時に決定できた。ただし、低 EC 条件においては、 σ_{TDT} が過大評価されるため、波形勾配と溶液 EC との経験的關係に基づいて再校正を行うことが望ましい。

引 用 文 献

- 1) Noborio, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry, *Computers and Electronics in Agriculture*, **31**: 213-237.
- 2) Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, **16**: 574-582.
- 3) Topp, G. C., Yanuka, M., Zebchuk, W. D. and Zegelin, S. (1988): Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines, *Water Resources Research*, **24**: 945-952.
- 4) 宮本英揮 (2011): 時間領域透過法, 水土の知, **24** (3): 36.
- 5) Robinson, D. A., Schaap, M., Jones, S. B., Friedman, S. P. and Gardner, C. M. K. (2003 b): Consideration for improving the accuracy of permittivity measurement using time domain reflectometry: Air - water calibration, effects of cable length, *Soil Science Society of America Journal*, **67**: 62-70.
- 6) Blonquist, J. M., Jr., Jones, S. B. and Robinson, D. A. (2005): A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics, *Journal of Hydrology*, **314**: 235-245.
- 7) 宮本英揮, 伊藤直樹, 安永円理子, 高市信也, 間瀬淳, 筑紫二郎 (2008): 広帯域インパルス信号を用いた時間領域透過法 (TDT) による誘電特性の計測, 土壌の物理性, **110**: 3-12.
- 8) 宮本英揮, 伊藤直樹, 間瀬淳, 徳本家康, 筑紫二郎 (2013): 土壌水分・電気伝導度の同時計測への時間領域透過法の適用, 農業農村工学会論文集, **288**: 513-519.
- 9) SDI-12 support group (2012): SDI-12 a serial-digital interface standard for microprocessor-based sensors version 1.3.
- 10) 宮本英揮, 下町多佳志, 筑紫二郎, 安永円理子 (2008): マイクロ波信号領域における粘土の誘電特性, 土壌の物理性, **110**: 13-23.
- 11) Mashimo, S., Umehara, T. and Redlin, H. (1991): Structures of water and primary alcohol studied by microwave dielectric analyses, *J. Chem. Phys.*, **95** (9): 6257-6260.
- 12) 伊藤祐二, 筑紫二郎, 宮本英揮 (2009): TDR による表層土壌水分計の開発とその有効性の評価, 土壌の物理性, **111**: 35-41.